

2. Briassulis G., Andreopoulos J. // 20th Int. Symp. Shock Waves (1995). Abstracts. Pasadena, CA. Grad. Aeronaut. Lab. Calif. Inst. of Technol., 1995. P. 527.
 3. Братинкова Е.А., Штеменко А.С., Шугаев Ф.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1998. №3. С. 63 (Moscow

University Phys. Bull. 1998. No. 3).
 4. Kiefer J.H., Hajduk J.C. // Proc. 12th Int. Symp. Shock Waves and Tubes. Jerusalem, 1980. P. 97.

Поступила в редакцию 13.01.99

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 621.315.592

ВЛИЯНИЕ КОНТАКТА ПРОСВЕТЛЯЮЩЕЕ ПОКРЫТИЕ — ПОЛУПРОВОДНИК НА СОПРОТИВЛЕНИЕ СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА

Г. Г. Унтила, А. С. Осипов, А. Б. Чеботарева

(НИИЯФ)

Выводится аналитическое выражение для эффективного последовательного сопротивления солнечного элемента (СЭ) $(n^+ - p)Si$ с просветляющим покрытием из оптически прозрачного проводящего оксида, например оксида сплава индия и олова (indium-tin-oxide — ИТО). Выражение показывает зависимость этого сопротивления от параметров СЭ, а именно от величины слоевого сопротивления ИТО и n^+ -слоя, контактного сопротивления между n^+ -слоем и ИТО, от ширины металлических полосок токособирающей сетки, а также от расстояния между ними.

Стандартные солнечные элементы (СЭ) из $(n^+ - p)Si$ обычно имеют диэлектрическое просветляющее покрытие. Поэтому фотогенерированный ток, инжектированный в n^+ -слой, течет к металлическим полоскам токособирающей сетки (ТСС) только через n^+ -слой (рис. 1). Обычно часть эффективного удельного последовательного сопротивления СЭ R_{sn} , связанную с распространением фототока по n^+ -слою, вычисляют с помощью выражения [1]

$$R_{sn} = \left(1 + \frac{w}{L}\right) R_n \frac{L^2}{3}, \quad (1)$$

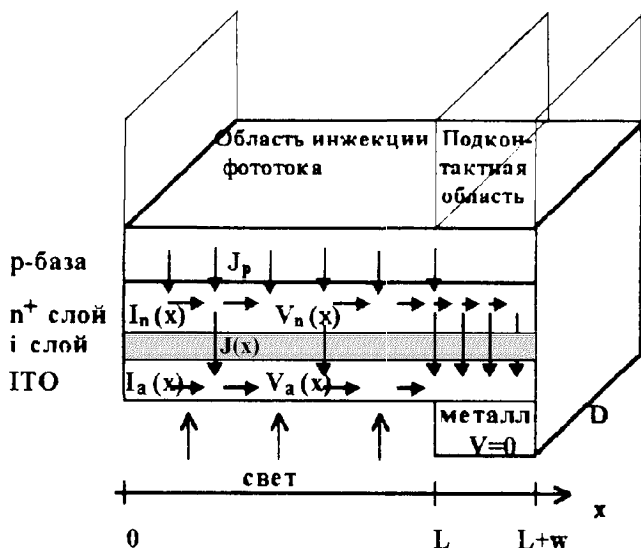


Рис. 1. Схема процесса съема тока в СЭ с просветляющим покрытием из ИТО: $J_p(x)$ — плотность фототока, инжектированного в n^+ -слой; $V_n(x)$ — распределение потенциала вдоль n^+ -слоя; $DI_n(x)$ — распределение тока, протекающего по n^+ -слою; D — длина металлической полоски

где R_n — слоевое сопротивление n^+ -слоя, $2L$ — расстояние между полосками ТСС, w — полуширина этих полосок. Для СЭ с электропроводящим просветляющим покрытием некоторые авторы [2] применяют выражение типа (1), в котором вместо R_n используют эффективное слоевое сопротивление $R_n R_a / (R_n + R_a)$, где R_a — слоевое сопротивление просветляющего покрытия. Однако для таких СЭ эта часть последовательного сопротивления должна зависеть также от контактного сопротивления R_c между n^+ -слоем и пленкой ИТО (i -слой на рис. 1) [3].

Целью данной работы было вывести аналитическое выражение для последовательного сопротивления СЭ типа ИТО/ $(n^+ - p)Si$, учитывающее наличие контактного сопротивления на границе ИТО/ $(n^+)Si$.

Решение данной задачи проводится при обычных в таких случаях допущениях, а именно что величина контактного сопротивления между металлической полоской и n^+ -слоем пренебрежимо мала, а также что величина фототока J_p , инжектированного в n^+ -слой, не меняется вдоль этого слоя: $J_p(x) = \text{const}$. Для получения формул, описывающих распределение тока в ИТО, n^+ - и i -слоях, необходимо решить систему уравнений

$$\begin{aligned} \frac{dV_n}{dx} &= -R_n I_n, & \frac{dV_a}{dx} &= -R_a I_a, \\ \frac{dI_n}{dx} &= J_p - J, & \frac{dI_a}{dx} &= J, \\ V_n - V_a &= J R_c, \end{aligned} \quad (2)$$

которая в сочетании с граничными условиями

$$\begin{aligned} V_n(L) &= D I_n(L) R_a, & V_a(L) &= 0, \\ I_n(0) &= 0, & I_a(0) &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

описывает процесс протекания тока на участке $0 < x < L$.

Переменные V_n, V_a, I_n, I_a, J соответствуют рис. 1. Выражение для сопротивления подконтактной области R_u , фигурирующего в граничном условии (3), было получено в работе [4]:

$R_u = (1/D)\sqrt{R_n R_c} \operatorname{cth}\left(\sqrt{R_n/R_c} w\right)$, где D — длина металлической полоски.

Решение данной системы уравнений имеет вид

$$I_a(x) = (J_p g_a)x + 2J_p \frac{A}{s} \operatorname{sh}(sx),$$

$$I_n(x) = (J_p g_n)x - 2J_p \frac{A}{s} \operatorname{sh}(sx),$$

$$J(x) = J_p g_a + 2J_p A \operatorname{ch}(sx),$$

$$V_a(x) = 2J_p A g_n R_c [\operatorname{ch}(sL) - \operatorname{ch}(sx)] + J_p \frac{g_n R_n}{2} (L^2 - x^2),$$

$$V_n(x) = 2J_p A g_n R_c [\operatorname{ch}(sL) - \operatorname{ch}(sx)] +$$

$$+ J_p \frac{g_n R_n}{2} (L^2 - x^2) + J_p g_a R_c + 2J_p R_c A \operatorname{ch}(sx),$$

где $s^2 = (R_a + R_n)/R_c$, $k^2 = R_n/R_c$, $g_a = R_n/(R_a + R_n)$, $g_n = R_a/(R_a + R_n)$,

$$A = \frac{sL}{2 \operatorname{sh}(sL)} \frac{g_n kL \operatorname{cth}(kw) - g_a}{kL \operatorname{cth}(kw) + sL \operatorname{cth}(sL)}.$$

Полная рассеиваемая мощность P в ИТО, n^+ -, i -слоях и подконтактной области вычисляется по известной формуле

$$P = R_a D \int_0^L I_a^2(x) dx + R_n D \int_0^L I_n^2(x) dx + R_c D \int_0^L J^2(x) dx + R_u D^2 I_n^2(L).$$

Таким образом, удельное последовательное сопротивление СЭ, имеющего площадь $D(L+w)$, можно представить в виде

$$R_s = \frac{P}{LDJ_p^2} \left(1 + \frac{w}{L}\right) = \left(1 + \frac{w}{L}\right) \times \left\{ \frac{R_n R_a}{R_n + R_a} \frac{L^2}{3} + R_c + R_c g_n^2 (sL \operatorname{cth}(sL) - 1) - R_c \frac{(g_n sL \operatorname{cth}(sL) + g_a)^2}{sL \operatorname{cth}(sL) + kL \operatorname{cth}(kw)} \right\}. \quad (4)$$

$R_{sm}(w) / R_{sm}(w=0)$

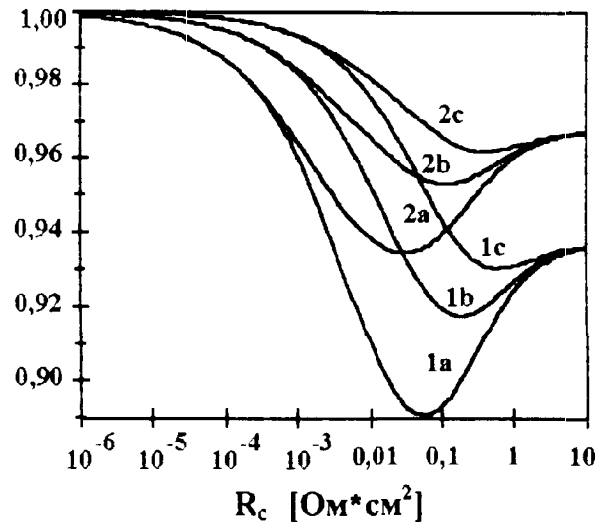


Рис. 2. Зависимость измеряемого последовательного сопротивления $R_{sm} = R_s / (D(L+w))$, нормированного на $R_{sm}(w=0)$, от R_c : $R_a = 40$ Ом, $L = 1,5$ мм, $w = 0,1$ мм (1) и $0,05$ мм (2), $R_n = 40$ (a), 80 (b) и 160 Ом (c)

Представляет интерес исследовать влияние ширины металлической полоски w на величину последовательного сопротивления. Формула (4) состоит из суммы четырех членов, умноженной на $(1 + w/L)$, причем четвертый член суммы — единственный зависящий от w , он равен нулю при $w = 0$. Увеличение толщины полоски приводит к уменьшению измеряемого последовательного сопротивления $R_{sm} = R_s / [D(L+w)]$, но не более чем на 10% для всех рассмотренных значений других параметров (рис. 2). Отличительная особенность состоит в том, что, когда контактное сопротивление R_c возрастает, все кривые стремятся к величине $L/(L+w)$. Для малых R_c ($R_c < 0,001$ Ом·см²) измеряемое сопротивление остается неизменным. Максимальное уменьшение R_{sm} (порядка 10%) наблюдается в диапазоне значений $0,01 < R_c < 1$ Ом·см². Это уменьшение убывает с возрастанием R_n/R_a и увеличением расстояния между полосками $2L$.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 96-02-16812а).

Литература

1. Dhariwal S.R., Mittal S., Mathur R.K. // Solid-State Electron. 1984. 27, No. 3. P. 267.
2. Яремчук А.Ф., Звероловлев В.Н., Павлов А.С., Раскин А.А. // Изв. вузов, Электроника. 1997. 5. С. 51.
3. Chaoui A., Ardebili R., Manificier J.C. // Solar Cells. 1985. 14. P. 133.
4. Унтила Г.Г., Барменов В.И., Рубин Л.Б. // ДАН СССР. 1985. 280. С. 408.

Поступила в редакцию
18.11.98